

О СОДЕРЖАНИИ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПЕРЕМЕННЫХ ТИПА RR ЛИРЫ ПОЛЯ И ИХ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ

М.Л.ГОЖА, В.А.МАРСАКОВ, В.В.КОВАЛЬ

Поступила 26 июля 2017

Принята к печати 14 декабря 2017

Составлен каталог химических и пространственно-кинематических параметров 415-ти переменных звезд типа RR Лиры (лириды) галактического поля. Собраны спектроскопические определения относительных содержаний 13-ти химических элементов в 101-й лириде из 25-ти статей, опубликованных с 1995 по 2017гг. Данные разных авторов приведены к единому солнечному обилию. Вычислены средневзвешенные значения содержаний химических элементов с коэффициентами, обратно пропорциональными заявленным авторами работ ошибкам. Анализ отклонений авторских относительных содержаний в каждой звезде от вычисленных по ним средневзвешенных значений показал отсутствие систематических смещений между результатами разных авторов. По данным нескольких источников посчитаны прямоугольные координаты 407-ми лирид и компоненты пространственных скоростей 401-й звезды. Сделан вывод, что собранные данные о содержаниях в лиридах поля химических элементов, произведенных в различных процессах ядерного синтеза, а также вычисленные пространственные скорости можно использовать для исследования эволюции Галактики.

Ключевые слова: переменные типа RR Лиры галактического поля: содержания химических элементов: кинематические параметры

1. *Введение.* Переменные звезды типа RR Лиры (лириды) - маломассивные ($M \sim 0.8 M_{\odot}$) короткопериодические ($P \sim 0.2 - 1^d$) гиганты горизонтальной ветви в фазе горения гелия в ядре - считаются старым (возраст >10 млрд. лет) и бедным металлами ($[Fe/H] < -0.5$) населением Галактики. Поскольку положение лирид на диаграмме Гершшпрунга-Рессела практически не зависит от возраста, определение их индивидуальных возрастов по теоретическим эволюционным трекам не представляется возможным, поэтому принадлежность такой звезды к определенной подсистеме Галактики можно попытаться определить, исследуя химический состав, а также особенности кинематики. Химический состав родительского газопылевого облака зависит от степени обогащения тяжелыми элементами, выброшенными в межзвездную среду звездами предыдущих поколений. А поскольку различные процессы синтеза происходят в звездах определенных масс, тяжелые химические элементы, произведенные в недрах этих звезд, обогащают межзвездную среду в разное время. Значит, относительные содержания химических элементов в атмосфере

звезд следующих поколений могут служить показателем возраста звезды. А кинематические параметры позволяют оценить принадлежность звезды к определенной подсистеме Галактики. Поэтому для комплексного исследования свойств переменных типа RR Лиры, прежде всего, необходимо, максимально используя данные первоисточников, составить компилятивный каталог спектроскопических определений металличности $[Fe/H]$, относительных содержаний других химических элементов $[el/Fe]$ в лиридах галактического поля. Кроме того, следует дополнить каталог положениями и компонентами пространственных скоростей. В настоящей работе будет описан процесс получения данных, входящих в каталог, а также их надежность для исследования связей между химическими и пространственно-кинематическими особенностями переменных типа RR Лиры галактического поля.

Как показали исследования, несмотря на то, что переменные типа RR Лиры находятся на поздней стадии эволюции, содержание тяжелых химических элементов (кроме лития) в их поверхностных оболочках сохраняется в неизменном виде с момента образования звезды (например, [1-3]). Таким образом, обилие химических элементов в атмосферах звезд несут в себе информацию о химическом составе межзвездного вещества, из которого они образовались, а значит, позволяют отслеживать химическую эволюцию Галактики.

2. Образование химических элементов в звездах разных масс.

Для каталога мы выбрали в литературе содержания α -элементов (кислорода, магния, кремния, кальция и титана), элемента железного пика (железа), элементов медленного (иттрия, циркония, бария и лантана) и быстрого нейтронных захватов (европия), а также элементов с нечетным числом протонов (натрия и алюминия). Известно, что масса звезды является основным определяющим фактором того, какими тяжелыми химическими элементами и в какое время звезда обогащает межзвездную среду на заключительном этапе своей жизни. В массивных ($M > 10 M_{\odot}$) короткоживущих звездах на поздних стадиях эволюции синтезируются α -элементы (много легких α -элементов (O, Mg и Si) и меньше тяжелых (Ca и Ti)), а также некоторое количество элементов железного пика. В результате вспышек таких звезд, как сверхновые II типа, произведенные в их недрах химические элементы выбрасываются в межзвездное пространство. Основное количество элементов группы железа производится на конечной стадии эволюции тесных двойных звезд с массами $M < 8 M_{\odot}$, которые взрываются как сверхновые типа Ia. Иттрий, цирконий, барий, лантан и европий синтезируются в процессе реакций нейтронных захватов в разных количественных соотношениях в результате медленных s-процессов или быстрых r-процессов. s-процессы

протекают во время тепловых пульсаций в оболочках звезд асимптотической ветви гигантов ($M < 4 M_{\odot}$); образовавшиеся элементы в результате сброса оболочки попадают в межзвездное пространство. Некоторое количество элементов медленных нейтронных захватов синтезируется в результате горения гелия в недрах массивных звезд. Синтез атомов в результате r -процессов происходит во время взрывов сверхновых II типа с массами $8 < M/M_{\odot} < 10$, когда в разлетающемся от звезды веществе потоки нейтронов бомбардируют ядра ранее образовавшихся элементов. Натрий и алюминий образуются в ядрах массивных звезд в реакциях гидростатического горения углерода и неона, дополнительный синтез возможен в реакциях нейтронного захвата.

Таким образом, α -элементы попадают в межзвездную среду раньше других тяжелых элементов (через миллионы или десятки миллионов лет после вспышки звездообразования), и в старых звездах должен наблюдаться их избыток. Но уже спустя примерно миллиард лет в газопылевой среде начинают вспыхивать сверхновые типа Ia и происходит постоянное увеличение элементов железного пика по отношению к α -элементам, элементам быстрых нейтронных захватов и элементам с нечетным числом протонов. Значит, о возрасте звезд, сформированных из уже обогащенной предыдущими поколениями звезд межзвездной материи, можно судить по относительным содержаниям химических элементов в их атмосферах.

3. Исходные данные для расчета обилий химических элементов и их надежность. Для исследований химических свойств переменных звезд типа RR Лиры галактического поля необходимо было найти как можно больше доступных определений содержаний химических элементов в атмосферах этих звезд. Были собраны спектроскопические определения относительных содержаний 13-ти химических элементов (O, Na, Mg, Al, Si, Ca, Ti, Fe, Y, Zr, Ba, La, Eu) в 101-й переменной типа RR Лиры поля. Источниками этих данных стали 25 статей, опубликованных с 1995г. по февраль 2017г. Ссылки на первоисточники включены в каталог.

Короткий период переменности блеска, высокие амплитуды лучевых скоростей оболочек лирид при их большой удаленности накладывают ограничения на продолжительность экспозиции. Тем не менее, содержания химических элементов в звездах типа RR Лиры, собранные в настоящей работе, определены по спектрам высокого разрешения, снятым с использованием достаточно крупных телескопов.

Панчино и др. [4] на большой выборке спектров переменных типа RR Лиры, охватывающей все стадии пульсации, подтвердили, что обилия химических элементов в лиридах могут быть получены с помощью классической техники эквивалентных ширин и статической модели атмосфер. При

определении значительной части отношений $[\text{Fe}/\text{H}]$ и $[\text{el}/\text{Fe}]$ использовались модели звездных атмосфер Куруца [5]. Анализ большинства спектров проведен в приближении локального термодинамического равновесия, но в ряде работ учтены отклонения от ЛТР для алюминия, натрия, кремния, кислорода и других элементов.

Ударная волна, проходящая во время пульсации через атмосферу звезды, оказывает значительное влияние на спектральные линии. Было установлено, что наиболее сильные и симметричные линии химических элементов в спектрах получаются вблизи минимума блеска и максимального радиуса переменной звезды, когда атмосфера неподвижна (см., например, [6,7]). Спокойной считается фаза около 0.35. Наиболее динамичная стадия вблизи минимального радиуса (фаза 0.8-1.0), при которой возникает ударная волна во время быстрого ускорения атмосферы, продолжается очень короткое время (~15 мин). Температура, ускорение силы тяжести и микротурбулентные скорости в атмосфере звезды изменяются с фазой синхронно, в то время как определяемые содержания химических элементов (кроме кремния и бария) в основном не зависят от фазы [2,4,8]. Необходимо учитывать, что содержание кремния следует использовать с осторожностью, если звезды наблюдаются во время фаз 0.8-1.0. В частности в работе [4] обнаружен большой разброс и систематический избыток $[\text{Si}/\text{Fe}]$ в лиридах по сравнению со звездами поля при $[\text{Fe}/\text{H}] < -1$. Что же касается обилия бария, то рекомендуется не использовать его для всех фаз пульсаций до тех пор, пока не появится толковое объяснение его поведения. Тем не менее, относительные содержания большинства химических элементов в звездах RR Лиры, наблюдаемых в разных фазах, можно использовать, как и другие звездные индикаторы, для отслеживания эволюции Галактики.

Как правило, спектры для определения обилий в работах были получены во время спокойных фаз, близких к 0.35. Однако в некоторых случаях в отсутствие спектров, полученных в оптимальную фазу пульсаций звезды, содержания химических элементов определялись по доступным спектрам. При наличии в статьях обилий, полученных для разных фаз пульсаций, мы отбирали только рекомендованные авторами работ результаты.

4. *Относительные содержания химических элементов и их ошибки.* При расчете относительных содержаний химических элементов авторы статей учитывали различные шкалы солнечных обилий. Чтобы получить возможность сопоставлять относительные содержания каждого химического элемента между звездами, необходимо было привести все собранные данные к единой солнечной шкале. При этом в нашем случае для сведения исходных данных в однородную шкалу только такая корректировка оказалась возможной.

Мы приняли солнечные обилия, рекомендованные Асплундом и др. [9], в качестве стандартных. Процедура заключалась в следующем: к авторскому значению $[e/H]$ прибавлялась разница между солнечными обилиями, принятыми авторами статей, и стандартными:

$$[e/H]_2 = [e/H]_1 + \log \epsilon(e)_{\odot 1} - \log \epsilon(e)_{\odot 2} .$$

Здесь $[e/H]_1$ и $[e/H]_2$ - относительное содержание химического элемента в звезде, полученное авторами статей и исправленное, соответственно; $\log \epsilon(e)_{\odot 1}$ - солнечное обилие элемента, использованное в работах, а $\log \epsilon(e)_{\odot 2}$ - стандартное солнечное обилие элемента [9]. В нескольких статьях авторы не указали принятую ими шкалу солнечных обилий, в этих случаях относительные содержания не исправлялись.

В ряде статей авторы определяли содержания железа, кремния и титана по линиям нейтральных и однократно ионизованных атомов отдельно. В таких случаях мы вычисляли среднее, а при наличии ошибок определения, средневзвешенное значение (см. текст далее). Необходимо отметить, что в подавляющем большинстве определений данные для нейтральных и ионизованных атомов хорошо согласуются между собой. Однако Говеа и др. [10] получили значительное отличие в относительных содержаниях $[Si/Fe]$ и $[SiII/Fe]$ для всех 8-ми звезд в работе (разница для каждой звезды варьируется от 0.27 до 1.17 dex), что подтверждает мнение о малой надежности определяемых обилий кремния в переменных звездах. К сожалению, других данных относительно содержания кремния в этих звездах нет.

Мы собрали информацию о химическом составе 101-й переменной типа RR Лирь. При этом обилия 59-ти звезд даны только в одной статье. Для 42-х лирид содержание одного и того же химического элемента измерено в двух или более работах (химический состав звезды RR Lyr определялся в наибольшем числе статей - 8-ми); в таких случаях вычислялись средневзвешенные значения с коэффициентами, обратно пропорциональными заявленным авторами статей неопределенностям. Только для нескольких обилий авторская ошибка превысила 0.3 dex. При наличии определений других авторов такие данные при усреднении учитывались с малым весовым коэффициентом. Однако в двух случаях это было единственное значение. Если в статьях не указывались ошибки измерения относительных содержаний, то мы принимали ошибки $\epsilon[e/F] = 0.2 \text{ dex}$ в работах, опубликованных до 1999г. включительно, и $\epsilon[e/F] = 0.1 \text{ dex}$ - в последующие годы.

В табл.1 приведены статистические сведения о каждом химическом элементе, включенном в нашу работу. Во втором столбце указано количество лирид, для которых известно относительное содержание химического элемента. Следующие два столбца содержат среднюю ошибку, вычисленную по

СТАТИСТИКА ОПРЕДЕЛЕНИЙ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ СОДЕРЖАНИЙ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И ИХ ОШИБОК

Химический элемент	Количество звезд	Средняя заявленная ошибка	Дисперсия заявленной ошибки	Количество пересекающихся определений	Дисперсия вычисленного среднего
Fe	101	0.14	0.04	121	0.12
O	25	0.18	0.06	17	0.13
Na	43	0.11	0.06	20	0.11
Mg	74	0.13	0.07	28	0.08
Al	45	0.14	0.08	10	0.17
Si	78	0.16	0.11	40	0.15
Ca	92	0.15	0.05	86	0.07
Ti	84	0.13	0.07	59	0.05
Y	44	0.11	0.08	19	0.07
Zr	16			4	0.11
Ba	69	0.12	0.06	49	0.09
La	11			4	0.06
Eu	16			2	0.16

приведенным в статьях неопределенностям, а также дисперсию этой ошибки. Далее показано число определений в случае двух и более известных значений обилий каждого элемента для той или иной звезды. Дисперсия посчитанных в этой работе средневзвешенных значений относительных содержаний дана в последнем столбце.

Средние значения неопределенностей, заявленных авторами работ, для всех элементов, как видно из таблицы, оказались в диапазоне $\varepsilon[e/F] = (0.11 - 0.18)$ при среднем значении для всех $\sigma_{\text{сп}}[e/F] = 0.14$. Для оценки внешней сходимости определений содержаний каждого элемента, полученных разными авторами, мы исследовали отклонения авторских относительных содержаний в данной звезде от вычисленных по ним средневзвешенных значений (см. два последних столбца табл.1). Дисперсии для разных химических элементов варьируются в пределах $\sigma[e/F] = (0.05 - 0.17)$, при этом среднее значение для всех элементов $\langle \sigma[e/F] \rangle = 0.11$. Как видим, внешние сходимости определений относительных содержаний химических элементов оказались даже немного меньше неопределенностей, заявленных авторами первоисточников. Для нескольких химических элементов с наибольшим количеством пересекающихся определений (Fe, Mg, Si, Ca, Ti, Ba) строились распределения отклонений авторских обилий в данной лириде от вычисленных по ним средневзвешенных значений (рис.1a-f). На всех панелях указана дисперсия вычисленного средневзвешенного значения относительного содержания для данного химического элемента.

Оказалось, что все гистограммы одновершинные, удовлетворительно описываются нормальным законом, что позволяет считать ошибки случайными. Итак, анализ внешней сходимости продемонстрировал отсутствие систематических смещений. Однако необходимо принять во внимание, что количество пересекающихся определений для большинства химических элементов все же невелико.

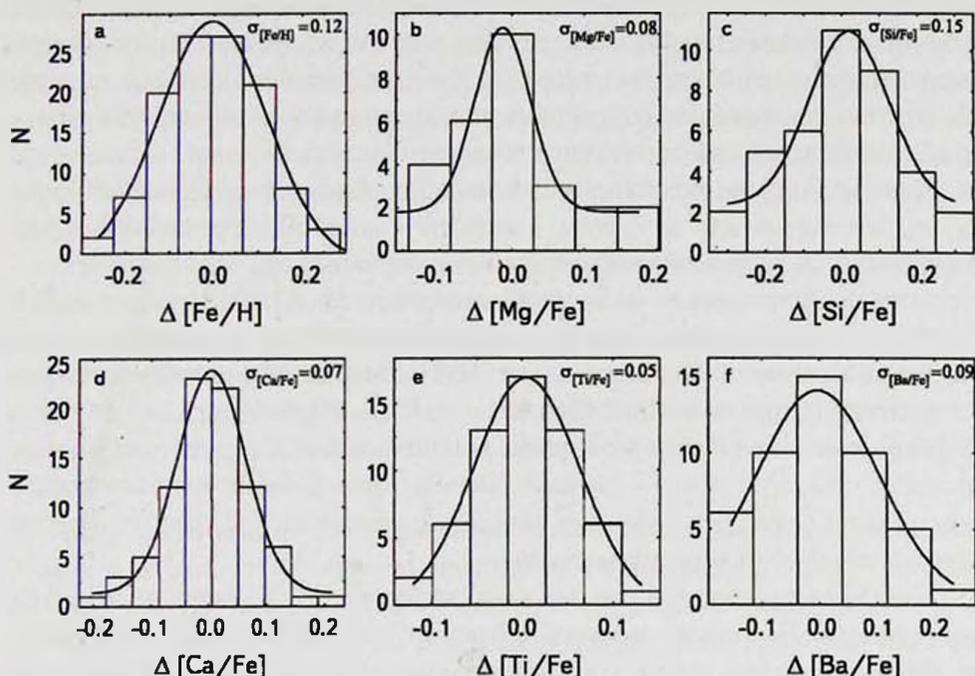


Рис.1. Распределения отклонений авторских значений относительных содержаний химических элементов в лиридах от вычисленных по ним средневзвешенных значений для железа (а), магния (b), кремния (с), кальция (d), титана (е), бария (f). На всех панелях указана дисперсия вычисленного средневзвешенного обилия.

Мы полагаем, что полученные сводные данные о содержаниях в лиридах поля химических элементов, произведенных в различных процессах ядерного синтеза, можно использовать для исследования хронологии образования и эволюции Галактики. Заметим, что каталогов, подобных составленному нами, с компиляцией относительных содержаний химических элементов для большого количества звезд типа RR Лиры галактического поля мы не обнаружили.

5. *Каталог параметров переменных звезд типа RR Лиры галактического поля.* Поскольку принадлежность к галактической подсистеме определяется, в том числе, и пространственно-кинематическими

свойствами звезды, в каталог были включены положения и скорости лирид. Основным источником данных стал каталог Дамбиса и др. [11], в котором собраны собственные движения и лучевые скорости 392-х звезд типа RR Лиры галактического поля. Расстояния до этих звезд посчитаны по приведенным в каталоге звездной величине в инфракрасной полосе Ks, периоду переменности и металличности с использованием соотношений из статьи [11]. Для звезд с известными обилиями, но отсутствующими в упомянутом выше каталоге, мы собрали необходимую информацию из различных источников. Так, расстояния были найдены для 15-ти звезд, для 9-ти из них удалось найти данные для расчета компонентов скоростей. Ссылки на источники пространственно-кинематических данных приведены в нашем каталоге.

Зная координаты, расстояния, собственные движения и лучевые скорости лирид, мы вычислили и внесли в каталог прямоугольные галактические координаты (x, y, z) , галактоцентрическое расстояние R_G , компоненты пространственных скоростей в прямоугольной (U, V, W) и цилиндрической (V_R, V_θ, V_z) системах координат, исправив скорости за движение Солнца относительно местного стандарта покоя (LSR). Движение Солнца относительно местного стандарта покоя приняли равным $(U, V, W)_\odot = (11.1, 12.24, 7.25)$ км/с [12], галактоцентрическое расстояние Солнца - 8.0 кпк, скорость вращения местного стандарта покоя - 220 км/с. Основываясь на ошибках расстояний, собственных движений и лучевых скоростей, получили, что средняя ошибка пространственной скорости равна 16 км/с.

Мы также включили в каталог металличности $[Fe/H]_D$ из каталога [11], вычисленные на основе индекса Престона для 392-х лирид. Сравнение спектроскопических и по индексу Престона определений $[Fe/H]$ для 78-ми звезд показало хорошее совпадение значений и отсутствие систематических смещений для основной массы лирид. Однако в нескольких случаях металличности существенно отличаются. Наибольшая разница в $[Fe/H]$ получилась для звезды V 455 Oph ($\Delta \approx 1.5$ dex). Пересчет расстояния для этой звезды со средневзвешенным спектроскопическим значением $[Fe/H]$ показал незначительное изменение пространственно-кинематических параметров (расстояние изменилось только на 0.04 кпк). Для V 455 Oph мы внесли в наш каталог расстояние, а также скорости, посчитанные по спектроскопическому $[Fe/H]$. Для других звезд расстояние оставили прежним.

Каталог дополнен значениями фундаментальных периодов пульсаций (для RRc типа посчитаны по формуле $\log P_f = \log P + 0.127$ [13]). Источниками периодов переменности послужили каталог [11], а также база данных SIMBAD.

6. Результаты. Создан каталог химических и кинематических параметров 415-ти переменных звезд поля типа RR Лиры. Каталог содержит галактические

и прямоугольные координаты, гелио- и галактоцентрическое расстояние для 407-ми лирид. Вычислены компоненты пространственных скоростей звезд относительно местного стандарта покоя (U, V, W)_{LSR}, компоненты скоростей в цилиндрической системе координат (V_R, V_θ, V_z) для 401-й звезды. Собраны приведенные к единой солнечной шкале и усредненные обилия 13-ти химических элементов в атмосферах 101-й лириды поля. Это наиболее полный на настоящий момент каталог относительных содержаний химических элементов в переменных звездах поля типа RR Лиры. Анализ внешней сходимости определений обилий каждого элемента показал отсутствие систематических смещений. В каталог добавлены металличности, посчитанные в работе [11] по индексу Престона для 392-х звезд и фундаментальные периоды всех переменных. Каталог доступен в электронном виде по адресу <ftp://cdsarc.u-strasbg.fr/pub/cats/J/AZh>.

Полагаем, что сводные данные о содержаниях в переменных звездах типа RR Лиры галактического поля химических элементов, произведенных в различных процессах ядерного синтеза, а также вычисленные пространственные скорости можно использовать для исследования эволюции Галактики. Данные каталога уже применяются для изучения связей кинематики и содержаний химических элементов в лиридах поля. Подробности представлены в работах Марсакова и др. [14,15].

Авторы благодарны А.С.Расторгуеву за вычисление расстояний до лирид. М.В.А. и Г.М.Л. благодарят за поддержку Минобрнауки РФ (госзадание №3.5602.2017/БЧ), а К.В.В. благодарит за поддержку Минобрнауки РФ (госзадание № 3.858.2017/4.6). В процессе работы была использована база данных SIMBAD (CDS, Strasbourg, France).

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия,
e-mail: gozha_marina@mail.ru

ON CHEMICAL ELEMENT ABUNDANCES IN RR LYRAE VARIABLES AND THEIR KINEMATIC PARAMETERS

M.L.GOZHA, V.A.MARSAKOV, V.V.KOVAL'

The catalog of chemical and spatial-kinematic parameters of 415 RR Lyrae variable stars of the galactic field is composed. Spectroscopic relative abundance determinations of 13 chemical elements in 101 RR Lirae variables from 25 papers

published from 1995 to 2017 are collected. The data of different authors are corrected to the same solar scale. The weighted averages of the chemical element abundances with coefficients inversely proportional to the errors reported by the authors of the papers were calculated. Analysis of the author's relative abundance deviations in each star from the weighted averages calculated from them showed the absence of systematic displacements among different authors. The rectangular coordinates of 407 RR Lyrae variables and the spatial velocity components of 401 stars are calculated according to data from several sources. It is concluded that the collected data on the chemical element abundances produced in various nuclear fusion processes within the field RR Lyrae variables, as well as the calculated spatial velocities, can be used to study the evolution of the Galaxy.

Key words: RR Lyrae variables of the galactic field: chemical element abundances: kinematic parameters

ЛИТЕРАТУРА

1. *G.Clementini, E.Carretta, R.Gratton et al.*, *Astron. J.*, **110**, 2319, 1995.
2. *B.-Q.For, C.Snedden, G.W.Preston*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **197**, 29, 2011.
3. *C.J.Hansen, B.Nordström, P.Bonifacio et al.*, *Astron. Astrophys.*, **527**, A65, 2011.
4. *E.Pancino, N.Britavskiy, D.Romano et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **447**, 2404, 2015.
5. *R.Kurucz*, ATLAS9 Stellar Atmosphere Programs and 2 km/s grid. Kurucz CD-ROM No. 13. Cambridge, Mass.: Smithsonian Astrophysical Observatory, 1993.
6. *K.Kolenberg, L.Fossati, D.Shulyak et al.*, *Astron. Astrophys.*, **519**, A64, 2010.
7. *C.Snedden, B.-Q.For, G.W.Preston*, in: *RR Lyrae Stars, Metal-Poor Stars, and the Galaxy*, ed. A.McWilliam, *Carnegie Observatories Astrophys. Ser.*, **5**, 196, 2011.
8. *S.Liu, G.Zhao, Y.-Q.Chen et al.*, *Research in Astron. Astrophys.*, **13**, 1307, 2013.
9. *M.Asplund, N.Grevesse, A.J.Sauval et al.*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **47**, 481, 2009.
10. *J.Govea, T.Gomez, G.W.Preston et al.*, *Astrophys. J.*, **782**, 59, 2014.
11. *A.K.Dambis, L.N.Berdnikov, A.Y.Kniazev et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **435**, 3206, 2013.
12. *R.Schonrich, J.Binney, W.Dehnen*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **403**, 1829, 2010.
13. *M.S.Frolov, N.N.Samus'*, *Astron. Letters*, **24**, 171, 1998.
14. *В.А.Марсаков, М.Л.Гожя, В.В.Коваль*, *Астрон. ж.*, **95**, 54, 2018.
15. *В.А.Марсаков, М.Л.Гожя, В.В.Коваль и др.*, *Астрофизика*, 2018 (в печати).